

КОМБИНИРОВАННЫЙ НАГРЕВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НАНО- И МИЛЛИСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.Д. Ивлев¹⁾, Е.И. Гацкевич²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь, ivlev-1947@mail.ru

²⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь, gatskevich_elena@yahoo.com

Проведена пирометрическая диагностика комбинированного воздействия милли- и наносекундного излучения рубиновых лазеров на монокристаллические пластины Si(100). Пирометрические измерения проводились на эффективной длине волны теплового излучения 0.53 мкм. Установлены зависимости пиковой температуры поверхности образца от плотности энергии в наносекундном импульсе и её величины при комбинированном нагреве кремния. Путем детектирования зондирующего излучения, отраженного от области лазерного воздействия, определен порог плавления (Si), инициируемого наносекундным нагревом, в зависимости от плотности энергии в миллисекундном импульсе.

Введение

Имеется большое число работ, в которых исследуется воздействие излучения одиночных лазерных импульсов на полупроводниковые материалы [1]. В отличие от большинства известных работ, в настоящей работе изучены эффекты комбинированного воздействия импульсов излучения рубиновых лазеров милли- и наносекундной длительности на пластины монокристаллического кремния Si(100). Исследования проводились методами пирометрической диагностики и детектирования отраженного от зоны нагрева излучения. Измерены температуры поверхности образцов и определены пороги плавления в условиях воздействия одного или двух лазерных пучков с заданной временной синхронизацией.

Эксперимент

В экспериментах использовались миллисекундный импульс (МИ) излучения рубинового лазера, работающего в режиме упорядоченной свободной генерации (длительность 0.7 мс по основанию импульса), и наносекундный импульс (НИ) излучения рубинового лазера с пассивной модуляцией добротности резонатора (длительность импульса 80 нс по уровню 0.5). Оба импульса характеризовались высокой однородностью распределения энергии излучения по сечению пучка. Реализована необходимая синхронизация одиночных вспышек лазеров с регулируемой задержкой генерации НИ относительно начала МИ в комбинированном воздействии сведенных лазерных пучков на исследуемые объекты при диаметре облучаемой зоны до 4 мм и высокой воспроизводимости задаваемых энергетических параметров облучения.

Пирометрические измерения температуры поверхности образцов в условиях воздействия одного или двух (НИ и МИ) лазерных пучков проводены на эффективной длине волны 0.53 мкм. Кроме контроля временных и энергетических параметров воздействующих импульсов, детектирования теплового излучения (ТИ) образцов в спектральной области 0.48 – 0.55 мкм, детектировалось также отраженное от зоны им-

пульсного нагрева излучение МИ, что позволяло контролировать образование расплава в Si.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 представлены осциллограммы миллисекундного импульса излучения (а), и сигналов пирометрического датчика, детектировавшего ТИ зоны воздействия МИ на кремний при плотности энергии $W_{ms} = 40 \text{ Дж/см}^2$ в двух вариантах: б - действие только МИ, в - комбинированное облучение с плотностью энергии в моноимпульсе $W_{ns} = 3 \text{ Дж/см}^2$.

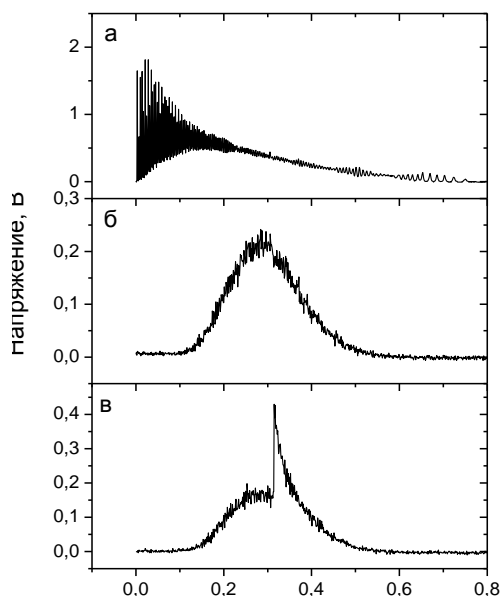


Рис. 1. Осциллограммы лазерного МИ (а), воздействующего на образец кремния, и теплового излучения Si: «б»- без дополнительного воздействия НИ, «в»- с дополнительным воздействием НИ.

Импульс второго лазера испускался через 0.3 мс от начала МИ, когда достигается максимальная температура поверхности образца (около 1550 К) вследствие нагрева миллисекундным излучением. При комбинированном воздействии

чётко наблюдается всплеск ТИ, связанный с дополнительным, моноимпульсным, нагревом облучаемой поверхности Si.

В результате исследования тепловых эффектов комбинированного воздействия лазерных импульсов с указанной временной синхронизацией с варьируемыми значениями W_{ms} и W_{ns} выяснено влияние величины W_{ms} как параметра на пиковую температуру T_p поверхности образцов (рис. 2) и установлены зависимости порога W_m лазерно-индуцированного воздействием НИ плавления приповерхностного слоя исследуемых кристаллов (рис. 3). Из сравнения зависимостей $T_p(W_{ns})$, полученных без дополнительного нагрева кремния излучением МИ и при действии такового ($W_{ms}=40 \text{ Дж/см}^2$), следует (рис. 2), что разница в достигаемых температурах возрастает до 230 К с повышением W_{ns} до 3 Дж/см^2 .

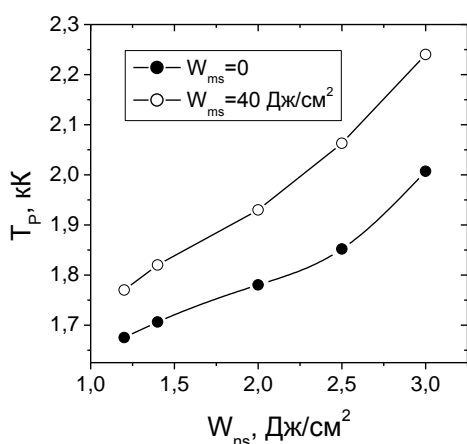


Рис. 2. Зависимости пиковой температуры поверхности Si от W_{ns} .

Величина W_m уменьшается практически линейно (рис. 3) с повышением плотности энергии излучения МИ.

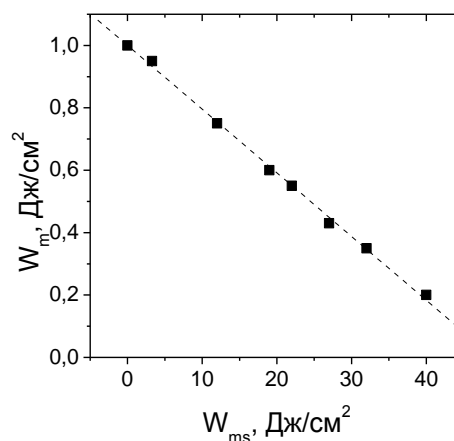


Рис. 3. Зависимости порога плавления W_m поверхности образцов от величины W_{ms} .

Заключение

Методами оптико-пирометрической диагностики лазерно-индуцированных процессов установлены корреляционные зависимости, характеризующие взаимосвязи энергетических и теплофизических параметров комбинированного воздействия лазерных импульсов на монокристаллический кремний.

Исследовано влияние плотности энергии облучения миллисекундного лазера на зависимости пиковой температуры поверхности образцов от плотности энергии облучения наносекундного лазера.

Установлены экспериментальные зависимости порогов плавления, инициируемого наносекундным нагревом облучаемой поверхности, от плотности энергии в импульсе миллисекундной длительности.

Список литературы

1. Bäuerle Dieter W. Laser Processing and Chemistry. Springer. 2011. 788 p.

COMBINED HEATING OF SINGLE Si BY NANO- AND MILLISECOND PULSES OF LASER RADIATION

G.D. Ivlev¹⁾, E.I. Gatskevich²⁾

¹⁾Belarusian State University,

Nezavisimosty Ave. 4, Minsk, 220030, Belarus, ivlev-1947@mail.ru

²⁾Belarusian National Technical University,

Nezavisimosty ave. 65, Minsk, 220013, Belarus, gatskevich_elena@yahoo.com

The pyrometry diagnostics of combined impact of milli- and nanosecond ruby laser radiation on single Si(100) plates has been carried out. Pyrometry measurements were conducted at the thermal radiation effective wavelength of $0.53 \mu\text{m}$. The dependence of surface peak temperature on energy density in nanosecond pulse and energy density at combined heating are obtained. The dependence of melting (initiated by nanosecond heating) threshold on millisecond pulse energy density is determined using the detection of probing radiation reflected from laser action zone.